



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

电路与磁路

蒲晓湘 石 红 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

电路与磁路

蒲晓湘 石 红 编
林春英 主审

大学图书馆
藏书章



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材。

全书共分为七章，主要内容包括电路的基本概念和基本定律、直流电阻电路的分析、正弦交流电路、三相正弦交流电路、非正弦周期电流电路、线性电路过渡过程的时域分析、磁路与铁心线圈等。附录部分是有关磁场及电磁感应的基本知识。

本书可作为高职高专电力技术类专业或相近专业的教材，还可作为考取电工类各工种职业资格证书的培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路与磁路/蒲晓湘, 石红编. —北京: 中国电力出版社, 2010.8

全国电力职业教育规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 0772 - 8

I. ①电… II. ①蒲…②石… III. ①电路理论-职业教育-教材
②磁路-职业教育-教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 175538 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 8 月第一版 2010 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 349 千字

定价 23.50 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

本书是根据高职高专电气、电子类专业《电路与磁路》课程教学大纲及教学基本要求编写的，供高职高专院校电气、电子类各专业教学使用，参考学时为 90~100 学时（不含实践性教学环节）。

本书的主要内容包括电路的基本概念和基本定律、直流电阻电路的分析、正弦交流电路、三相正弦交流电路、非正弦周期性电流电路、线性电路过渡过程的时域分析、磁路与铁心线圈等。考虑到高职高专各专业教学的需要，书中编写了有关磁场及电磁感应的基本知识，放在附录部分，供学生自学和参考。本书的特点如下：

（1）全书在内容的选择上，遵循“以应用为目的，以够用为度”的原则，注重高职高专应用型人才“必需”能力的培养，而且要为后续课程提供“够用”的基础知识。

书中标 * 的章节作为选学内容。

（2）各章节内容的处理上，突出基本概念和基本方法，注重问题的分析与综合。重点内容都有归纳和注意事项，方法的应用也有一般步骤。章节前有基本要求，以明确学习目标；章节后有小结，归纳和总结本章的重点内容。

（3）书中例题典型，有明确的解题思路、解答过程及步骤，目的在于引导和培养学生分析问题和解决问题的能力。各章后附有适量的习题，题型多样化。

本书第一、三、四章由重庆电力高等专科学校石红编写，第二、五至七章及附录部分由重庆电力高等专科学校蒲晓湘编写，全书由山东电力高等专科学校林春英教授主审。

本书在编写过程中，参阅了大量现有的同类教材，也得到了审稿老师及很多同事的大力支持和帮助，为本书的编写提出了许多宝贵的意见和建议，尤其是重庆电力高等专科学校的王敬镛、牛均莲和邱兴云老师，提供了大量宝贵的素材，在此一一表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中内容难免有不足、甚至错误之处，敬请读者予以批评指正。

编者

2010 年 5 月

目 录

前言

第一章 电路的基本概念和基本定律	1
第一节 电路和电路模型	1
第二节 电路的主要物理量	3
第三节 基尔霍夫定律	9
第四节 电阻、电感、电容元件	12
第五节 电压源和电流源	18
* 第六节 受控源	22
本章小结	23
习题一	24
第二章 直流电阻电路的分析	28
第一节 电阻的串联和并联	28
第二节 电阻的星形连接与三角形连接	35
第三节 电源的串联与并联	38
第四节 支路电流法	43
第五节 节点电压法	46
第六节 叠加定理	52
第七节 戴维南定理	55
本章小结	57
习题二	58
第三章 正弦交流电路	62
第一节 正弦量的基本概念	62
第二节 正弦量的相量表示法	66
第三节 正弦电路中的电阻元件	71
第四节 正弦电路中的电感元件	73
第五节 正弦电路中的电容元件	75
第六节 相量形式的基尔霍夫定律	77
第七节 阻抗和导纳	80
第八节 正弦交流电路的功率	88
第九节 正弦交流电路的相量分析法	94
第十节 电路的谐振	99
本章小结	103
习题三	105
第四章 三相正弦交流电路	111

第一节 三相电源的连接·····	111
第二节 三相负载的连接·····	116
第三节 对称三相电路的分析·····	119
第四节 不对称三相电路的分析·····	123
第五节 三相电路的功率·····	128
第六节 三相电压和电流的对称分量·····	134
本章小结·····	136
习题四·····	137
第五章 非正弦周期电流电路 ·····	140
第一节 非正弦周期信号·····	140
第二节 周期函数分解为傅里叶级数 ·····	141
第三节 非正弦周期量的有效值、平均值和平均功率·····	144
第四节 非正弦周期电流电路的计算·····	148
本章小结·····	152
习题五·····	153
第六章 线性电路过渡过程的时域分析 ·····	156
第一节 换路定律及初始值计算·····	156
第二节 一阶电路的零输入响应·····	160
第三节 一阶电路的零状态响应·····	166
第四节 一阶电路的全响应·····	171
本章小结·····	176
习题六·····	177
第七章 磁路与铁心线圈 ·····	181
第一节 磁场的基本物理量·····	181
第二节 磁场的基本性质·····	183
第三节 铁磁性物质·····	184
第四节 磁路及基本定律·····	187
第五节 恒定磁通磁路的计算·····	190
第六节 交流铁心线圈·····	195
本章小结·····	203
习题七·····	204
附录 A 常用铁磁性物质的磁化数据表 ·····	207
附录 B 磁场基本知识及电磁感应 ·····	209
B-1 磁场的基本概念 ·····	209
B-2 安培环路定律及应用 ·····	211
B-3 磁场对通电导体的作用力 ·····	213
B-4 电磁感应 ·····	215
参考文献 ·····	223

电路的基本概念和基本定律

本章内容主要包括电路和电路模型的基本概念、电路的主要物理量、组成电路的电路元件以及电路的最基本定律基尔霍夫定律。

基本要求：

- (1) 了解电路的组成及其基本物理量的意义、单位和符号。
- (2) 掌握电压、电流的概念及其参考方向的规定。
- (3) 掌握电能与电功率的计算方法。
- (4) 了解电压源与电流源元件的特性，掌握两种实际电源模型。
- (5) 掌握基尔霍夫定律及其在电路分析计算中的应用。

第一节 电路和电路模型

一、电路

我们在工作和生活中会遇到很多实际电路。例如，图 1-1 (a) 所示为最简单的手电筒的实际电路；图 1-2 所示为由发电机、变压器、输电线路等所构成的复杂的电力输电电路。像这种，根据需要把一些电气器件按照一定的方式连接起来所构成的电流的通路，称为电路。

实际应用电路的种类繁多，功能也各不相同，但它们的作用可归结为两个。其中一种作用是实现电能的传输和转换。例如在图 1-1 所示电路中，当开关一闭合，灯泡就发光发热，干电池把化学能转换成电能，

灯泡又将电能转换成了光能和热能；图 1-2 所示电路中，发电机把机械能转换为电能，通过变压器、输电线路输送给用户，电动机又把电能转换为机械能，电灯把电能转换为光能、热能等。将其它形式能量转换为电能，提供电能的设备或器件称为电源，如干电池、发电机、蓄电池等。将电能转换为其它形式能量的用电设备或器件称为负载，如电灯、电动机、电炉等。把连接电源和负载的部分称为中间环节，如变压器、开关、输电线路等，它起传输、分配和控制电能的作用。

电路的另一种作用是实现信号的传递和处理，常见的例子如图 1-3 所示的扩音电路，传声器（话筒）将声音变成电信号，经过放大器的放大，送到扬声器再变成声音输出。话筒是输入信号的设备，称为信号源，相当于电源。扬声器是接受和转换信号的设备，也就是负载。

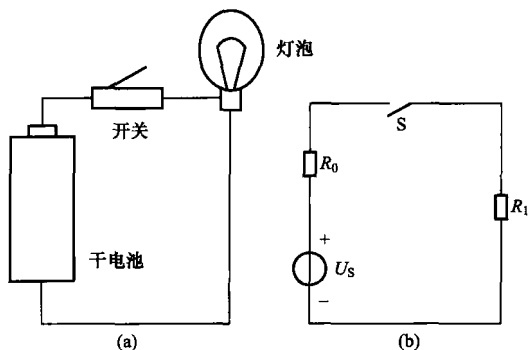


图 1-1 手电筒的实际电路和电路模型

(a) 实际电路；(b) 电路模型



图 1-2 电力输电电路

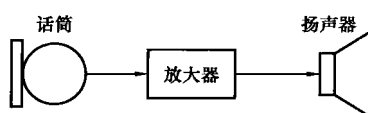


图 1-3 扩音电路

由于电路中的电流、电压是在电源的作用下产生的，因此电源又称为激励源或激励，而由于电源的激励在电路各部分产生的电流、电压则称为响应。

由以上几个例子可见，一个完整的电路主要由电源、负载和中间环节三部分组成。

在电视机、音响设备、通信系统、计算机和电力网络中可以看到各种各样的电路，它们都是物理实体，称为实际电路。

二、理想电路元件

实际电路中的电气器件品种繁多，其电磁性能的表现往往多方面交织在一起。为了能对实际电路进行定量的分析，我们必须把其中的部件加以近似化、理想化，只考虑起主要作用的某些电磁现象，而将次要因素忽略，或将一些电磁现象分别进行表示。例如在图 1-1 (a) 中，小灯泡（负载）不但发光发热而消耗电能，并在其周围还会产生一定的磁场，在允许的误差范围内，可以不考虑小灯泡产生磁场的作用，而只考虑小灯泡发光发热消耗电能的作用；干电池不仅对外提供电能，在其内部也有电能消耗，可以分别表示其提供的电能和消耗的电能。这样，任何实际电气器件都可以用一种或多种理想电路元件来表示。

所谓理想电路元件是实际器件的理想化模型，每一种电路元件都只表示一种电磁现象，并具有某种确定的电磁性能和精确的数学定义。例如，电阻元件是一种只表示消耗电能的元件，电感元件是表示其周围空间存在磁场而可以储存磁场能量的元件，电容元件是表示其周围空间存在电场而可以储存电场能量的元件，电源元件是表示将其它形式的能量转变成电能的元件。

上述这些理想电路元件通过引出端钮互相连接。根据元件对外连接端子的数目，理想元件可分为二端、三端、四端元件等。有两个端钮的元件称为二端元件，有三个及三个以上端钮的元件称为多端元件。

三、电路模型

本书讨论的对象不是实际电路而是实际电路的模型。实际电路的电路模型是由一个或多个理想电路元件经理想导线连接起来，用来模拟实际电路。图 1-1 (b) 便是图 1-1 (a) 的电路模型，电路中，灯泡的主要电磁性能是发光发热消耗电能，用电阻元件表示；干电池不仅对外提供电能，在其内部也有电能消耗，用电压源和电阻串联组合表示。

用理想电路元件或它们的组合模拟实际器件就是建立其模型，简称建模。用理想电路元件建立的电路模型将使电路的分析大大简化。建模时必须考虑工作条件，并按不同准确度的要求把给定工作条件的主要物理现象和功能反映出来。同一器件或电路在不同的条件下应以不同的电路模型表示。例如，一个线圈是由导线绕制而成，除电感外还有电阻，同时线圈匝间还有电容。在不同的工作条件下，其电路模型不一样：在直流情况下，它的模型是电阻元件；在低频正弦激励下，它的模型是电阻元件与电感元件的串联；在高频正弦激励下，其模型中还应包含电容。所以，建立电路模型一般应指明它们的工作条件（如频率、电压、电流、温度范围等）。电路模型虽然不可能和实际电路完全一致，但在一定条件下，在工程允

许的误差范围内, 电路模型可以代替实际电路, 从而使电路的分析计算简化。今后本书所涉及电路均指由理想电路元件构成的电路模型, 无论简单电路还是复杂电路, 都可以通过电路模型来描述, 理想化的电路模型简称为电路, 同时理想电路元件简称为电路元件。

电路元件都用规定的图形符号表示, 再用理想导线 (导线电阻为零) 连接, 这样画出来的图形叫电路图。电路图是用图形表达的实际电路的模型。

电路可分为集总参数电路和分布参数电路。集总意味着把电路中的电场和磁场分开, 磁场只与电感元件相关, 电场只与电容元件相关, 两种场之间不存在相互作用。即每一种元件只表示一种基本现象, 在任何时刻, 从具有两个端钮的理想元件的某一端钮流入的电流恒等于从另一端钮流出的电流, 并且元件两个端钮间的电压值也是完全确定的。本书研究的都是集总参数电路, 以后不另加说明。

第二节 电路的主要物理量

一、电流及其参考方向

1. 电流

带电粒子 (电子、离子等) 的定向移动形成电流。电流是既有大小又有方向的物理量。习惯上规定, 正电荷移动的方向为电流的正方向。电流的大小用电流强度这个物理量来衡量, 电流强度简称电流。电流的大小等于单位时间内通过导体某一横截面的电荷量

设在 dt 时间内通过导体某一横截面的电荷量为 dq , 则通过该截面的电流为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

大小和方向都不随时间改变的电流, 称为直流电流, 简称直流 (DC), 用大写字母 I 表示, 所以式 (1-1) 可改写为

$$I = \frac{q}{T} \quad (1-2)$$

式中, q 为在时间 T 内通过某处的电荷量。

大小和方向随时间周期性变化且平均值为零的电流, 称为交变电流, 简称交流 (AC), 用小写字母 i 表示。

在国际单位制 (SI) 中, 电流的单位是安 [培], 符号为 A; 电荷量的单位是库 [仑], 符号为 C。当 1s 均匀通过导体横截面的电荷量为 1C 时, 电流大小为 1A。另外, 电流常用的单位还有 kA (千安)、mA (毫安)、 μA (微安) 等。它们之间的换算关系为

$$1\text{kA} = 10^3\text{A}, 1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}, 1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$$

2. 电流的参考方向

电流的方向是客观存在的。电流在一条电路中流动的实际方向只有两种可能 (见图 1-4), 其电流方向不是从 a 端流向 b 端, 就是从 b 端流向 a 端, 在简单直流电路中, 我们较容易判断电流的实际方向, 但在复杂的直流电路以及交流电路中, 就很难判断电流的实际方向。因为, 在交流电路中, 电流的大小和方向不断随时间变化,

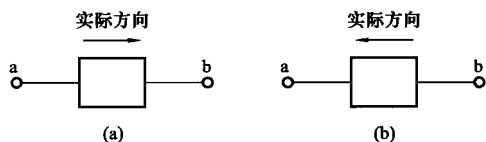


图 1-4 电流的实际方向

在复杂的直流电路中,还必须经过计算或实测才能确定。为此,在分析与计算电路时,特地引入参考方向这一概念。

在分析与计算电路时,任意规定某一方向作为电流数值为正的方向,称为参考方向。电流参考方向有两种表示方法:①用箭头表示,箭头的指向为电流的参考方向;②用双下标表示,如 i_{ab} , 电流的参考方向由 a 指向 b, 如图 1-5 所示。

如果用 i_{ba} , 表示其参考方向由 b 指向 a, 显然

$$i_{ab} = -i_{ba} \quad (1-3)$$

规定了参考方向以后,电流就是一个代数量,如果电流为正值,则电流的实际方向和所选的参考方向相同;如果电流为负值,则电流的实际方向和所选的参考方向相反。这样,就可以利用电流的正负和所标注的参考方向来判断电流的实际方向,如图 1-6 所示。

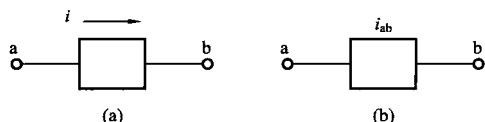


图 1-5 电流的参考方向

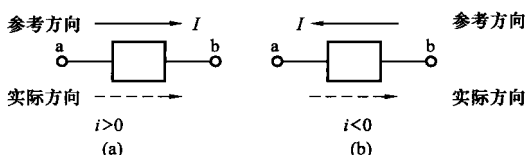


图 1-6 实际方向与参考方向的关系

应当注意:在分析电路时,首先要规定电流的参考方向,并在规定的参考方向下分析计算,最后再从答案的正负来判断电流的实际方向;参考方向可以任意规定而不影响计算结果,但未规定参考方向的情况下,电流的正负号是没有意义的。

二、电压及其参考方向

1. 电压

当导体中存在电场时,电荷在电场力作用下运动,电场力对运动电荷做功,运动电荷电能减少,电能转换成其它形式的能量。电路中任意两点 a、b 间的电压是电场力把单位正电荷由 a 点移到 b 点所减少的电能。

设正电荷 dq 由 a 点移到 b 点所减少的电能为 dW , 则 a、b 两点间的电压为

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1-4)$$

电压和电流一样,也是既有大小又有方向的物理量。电压表明正电荷转移时减少的电能,减少电能意味着电位的降低,即从高电位到低电位,所以电压的实际方向是由高电位指向低电位或者说是电位降低的方向。

大小和方向都不随时间改变的电压是直流电压,用大写字母 U 表示;大小和方向随时间按周期性变化的交流电压用小写字母 u 表示。

在国际单位制(SI)中,电压的单位是伏[特],符号为 V。当 1C 的电荷在电场力的作用下由一点转移到另一点减少的电能是 1J 时,则这两点之间的电压就是 1V。电压的常用单位还有 kV(千伏)、mV(毫伏)和 μV (微伏)等。它们之间的换算关系为

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}, 1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}, 1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}$$

2. 电压的参考方向

与电流相同,在分析计算电路时,必须先规定某一方向作为电压数值为正的方向,称为参考方向。通常有三种表示形式:

(1) 采用正负极性表示。在电路图上标出正 (+)、负 (-) 极性, 如图 1-7 (a) 所示, 正极指向负极的方向就是电压的参考方向。

(2) 采用箭头表示。用箭头表示在电路图上, 如图 1-7 (b) 所示, 顺箭头方向即 a 至 b 的方向就是电压的参考方向。

(3) 采用双下标表示。如图 1-7 (c) 所示, u_{ab} 表示电压的参考方向由第一个下标 a 至第二个下标 b。

电压的参考方向指定后, 电压就是一个代数量, 当电压实际方向与参考方向一致时, 电压为正值, 当电压实际方向与参考方向相反时, 电压为负值。

任一电路电压电流的参考方向可以分别独立设定。但为了分析方便, 常使同一个元件的电流参考方向与电压参考方向一致, 即电流从该元件的电压正极性端流入而从它的负极性端流出, 像这样, 如果电压电流参考方向选取一致, 称为关联参考方向, 如图 1-8 (a) 所示。相反则称为非关联参考方向, 如图 1-8 (b) 所示。

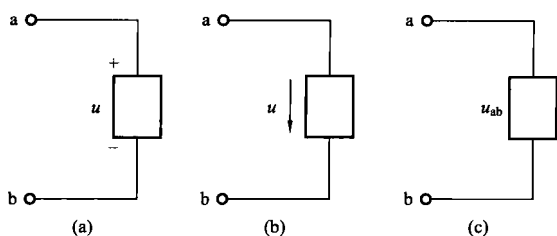


图 1-7 电压的参考方向

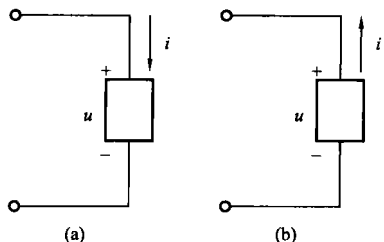


图 1-8 电压电流的关联和非关联参考方向

【例 1-1】 电压电流参考方向如图 1-9 所示, 问: 对 N 、 N_1 两部分电路电压电流参考方向是否关联?

解 N 部分电路电流从电压的正极流出, 电压、电流参考方向相反, 为非关联参考方向; N_1 部分电路电流从电压的正极流入, 电压、电流参考方向相同, 为关联参考方向。

最后, 再次强调以下几点以便引起注意:

(1) 在分析与计算电路时, 首先要规定电压电流参考方向, 并在电路图中标注出来。

(2) 参考方向可以任意规定而不影响计算结果。

(3) 参考方向一经规定, 在整个分析计算过程中就必须以此为准, 不能变动。

(4) 不标参考方向的电流或电压是没有意义的。

(5) 电流和电压参考方向可以分别独立地规定, 但为了分析问题方便, 常规定元件电压电流方向为关联参考方向。

三、电位及电动势

1. 电位

在电子电路的分析和电气设备的检修调试时, 常常用到电位这一物理量。在电路中任意选一点 o 作为参考点, 则由某点 a 到参考点 o 的电压称为 a 点的电位, 在数值上等于电场力将单位正电荷从该点移动到参考点所做的功, 电位是衡量电路中各点所具有的电位能大小的物理量。电位用 φ 表示, 则 a 点的电位用 φ_a 表示。参考点可以任意选择, 但一个电路只能选

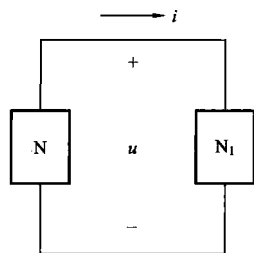


图 1-9 [例 1-1] 图

一个参考点,并规定参考点电位为零,即参考点就是零电位点。指定参考点后,电位为代数量,电路中电位比参考点高者,电位值为正;电位比参考点低者,电位值为负。

对照电压与电位的定义式,不难得出它们之间的关系:两点之间的电压等于对应两点电位之差,即

$$u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1-5)$$

式中, φ_a 为 a 点电位, φ_b 为 b 点电位。

由式 (1-5) 可见,当 $\varphi_a > \varphi_b$ 即 a 点电位高于 b 点电位时, $u_{ab} > 0$, 反之, $u_{ab} < 0$ 。

电位与电压同量纲,在国际单位制 (SI) 中,电位的单位是伏 [特],符号为 V。

在分析电路时,电位参考点的选择原则上是任意的,但实际中常选择大地、设备外壳或接地点作为参考点。选择大地为参考点时,在电路图中用符号 “ $\perp$ ” 表示,有些设备的外壳是接地,凡是与外壳相连的各点,均是零电位点。有些设备的外壳不接地,则选择许多导线的公共点 (也可是外壳) 作参考点,电路中用符号 “ $\perp$ ” 表示。一个电路只能选一个参考点,参考点选择不同,则各点电位就不一样。电位的大小与参考点的选择有关,而电压与参考点的选择无关。

另外,电子电路和电气设备的检修调试时,需要测量电位。测量电位实质上就是测量电压,是测量该点与参考点之间的电压。

【例 1-2】 如图 1-10 所示,已知 4C 正电荷由 a 点均匀移动至 b 点电场力做功为 8J,由 b 点移动到 c 点电场力做功为 12J,则:

- (1) 若以 b 点为参考点,求 a、b、c 点的电位和电压 U_{ab} 、 U_{bc} ;
- (2) 若以 c 点为参考点,再求以上各值。

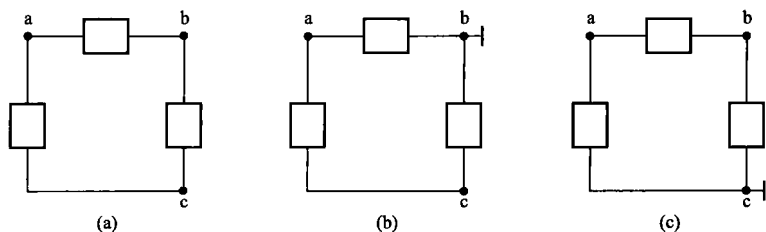


图 1-10 [例 1-2] 图

解题思路: 根据电压的定义式 $U_{ab} = \frac{dW}{dq}$ 求电压;选定参考点,再根据 $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$ 求电位。

解 (1) 以 b 点为电位参考点,则 $\varphi_b = 0$ 。

已知 4C 正电荷由 a 点均匀移动至 b 点电场力做功为 8J,由 b 点移动到 c 点电场力做功为 12J,由电压的定义式可得

$$U_{ab} = \frac{dW_{ab}}{dq} = \frac{8}{4} = 2 \text{ (V)}, U_{bc} = \frac{dW_{bc}}{dq} = \frac{12}{4} = 3 \text{ (V)}$$

由电压与电位的关系可得

$$\begin{aligned} U_{ab} &= \varphi_a - \varphi_b, U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c \\ \varphi_a &= U_{ab} + \varphi_b = 2 + 0 = 2 \text{ (V)}, \varphi_c = \varphi_b - U_{bc} = 0 - 3 = -3 \text{ (V)} \end{aligned}$$

(2) 若以 c 点为参考点, 则 $\varphi_c = 0$ 。

由于电位在数值上等于电场力将单位正电荷从该点移动到参考点所做的功, 则

$$\varphi_a = \frac{dW_{ac}}{dq} = \frac{dW_{ab} + dW_{bc}}{dq} = \frac{8 + 12}{4} = 5 \text{ (V)}$$

$$\varphi_b = \frac{dW_{bc}}{dq} = \frac{12}{4} = 3 \text{ (V)}$$

由电压与电位的关系可得

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = 5 - 3 = 2 \text{ (V)}$$

$$U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c = 3 - 0 = 3 \text{ (V)}$$

由 [例 1-2] 再次说明: 电路中电位参考点可任意选择; 参考点一经选定, 电路中各点的电位值就是唯一的; 当选择不同的电位参考点时, 电路中各点电位值将改变, 但任意两点间电压保持不变, 即两点间电压与参考点的选择无关。

2. 电动势

电动势是描述电源对外做功本领的一个物理量。在电场力作用下, 正电荷从高电位点运动向低电位点。为了在电路中形成连续的电流, 在电源中必须有电源力 (譬如干电池中的化学力, 发电机中的电磁力) 把正电荷从低电位点推向高电位点, 即把正电荷从电源负极移向正极。在此过程中, 电源便把其它形式的能量转变成电能。电源的电动势就是表明单位正电荷在电源力作用下由电源负极转移到电源正极时增加的电能, 电动势用符号 e 表示, 则

$$e = \frac{dW_s}{dq} \quad (1-6)$$

式中, dq 是转移的电荷; dW_s 是转移过程中电荷增加的电能。

增加电能意味着电位的升高 (从低电位点到高电位点), 所以, 电动势的实际方向规定为电位升高的方向。如果选择电动势的参考方向与电压的参考方向如图 1-11 (a) 所示, 则电动势电压之间的关系为 $u = e$ 。如果选择电动势的参考方向与电压的参考方向如图 1-11 (b) 所示, 则电动势电压之间的关系为 $u = -e$ 。

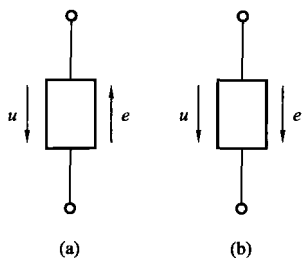


图 1-11 电压和电动势的参考方向

电动势的 SI 单位都是伏 [特], 符号为 V。常用的单位还有 kV (千伏)、mV (毫伏) 和 μV (微伏) 等。

四、电功率

在电路分析和计算中, 功率是一个十分重要的物理量。任何电气设备电路元件本身都有功率的限制, 如果超过限定值, 设备元件将不能正常工作, 甚至损坏。

在电路中, 设 a、b 两点之间的电压为 u , 正电荷 dq 在电场力的作用下, 从高电位点 a 移向低电位点 b, 则减少的电能为 dW , 则根据电压的定义式可得

$$dW = u dq$$

电能减少意味着电能转换成了其它形式的能量。电能转换的速率称为电功率, 简称功率。功率用 p 表示, 则

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1-7)$$

设电路中电压电流参考方向关联, 由电流的定义 $i = \frac{dq}{dt}$ 可得

$$dW = udq = uidt$$

则

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{uidt}{dt} = ui \quad (1-8)$$

直流时, 功率不变, 用大写字母 P 表示, 即

$$P = UI \quad (1-9)$$

功率的 SI 单位为瓦 [特], 符号为 W。元件端电压为 1V, 通过电流为 1A 时, 则该元件吸收功率为 1W。常用的功率单位还有 kW (千瓦)、MW (兆瓦)。

$$1\text{kW} = 10^3\text{W}, 1\text{MW} = 10^6\text{W}$$

计算功率时, 如果电压电流为关联参考方向, 则上两式带正号, 即

$$p = ui \quad \text{或} \quad P = UI \quad (1-10)$$

如果电压电流为非关联参考方向, 则两式带负号, 即

$$p = -ui \quad \text{或} \quad P = -UI \quad (1-11)$$

在电路分析时, 不仅要计算功率的大小, 有时还要判断功率的性质, 即该元件是提供功率还是消耗功率。由式 (1-10) 和式 (1-11) 得到的功率为正值时, 说明这部分电路吸收 (消耗) 功率, 该元件作为负载工作; 若为负值时, 则说明这部分电路提供 (产生) 功率, 该元件作为电源工作。

由能量守恒定律可知: 一个电路中, 每一瞬间, 接受电能的各元件功率之和等于发出电能的各元件功率之和; 或者说, 一个电路中, 每一瞬间, 所有元件接受功率之总和为零。这个结论叫做“电路的功率平衡”。我们常常利用这个结论来验证电路计算的正确性。

【例 1-3】 图 1-12 所示为直流电路, $U_1 = 10\text{V}$, $U_2 = -4\text{V}$, $U_3 = 3\text{V}$, $U_4 = 11\text{V}$, $I = 2\text{A}$, 求各元件的功率 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 。

解题思路: 选择功率的计算公式, 电压电流为关联参考方向, $P = UI$; 电压电流为非关联参考方向, $P = -UI$; 得到的功率为正值时, 说明这部分电路吸收 (消耗) 功率; 若为负值时, 则说明这部分电路提供 (产生) 功率。

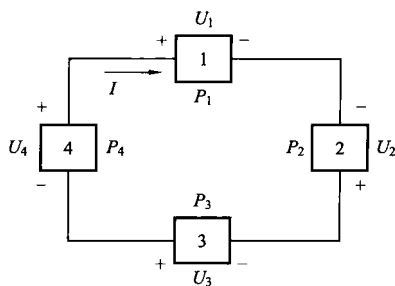


图 1-12 [例 1-3] 图

解 元件 1 的电压、电流为关联参考方向, 则

$$P_1 = U_1 I = 10 \times 2 = 20 (\text{W}) > 0 \quad (\text{吸收 } 20\text{W})$$

元件 2、元件 3 和元件 4 的电压、电流为非关联参考方向, 则

$$P_2 = -U_2 I = -(-4) \times 2 = 8 (\text{W}) > 0 \quad (\text{吸收 } 8\text{W})$$

$$P_3 = -U_3 I = -3 \times 2 = -6 (\text{W}) < 0 \quad (\text{提供 } 6\text{W})$$

$$P_4 = -U_4 I = -11 \times 2 = -22 (\text{W}) < 0 \quad (\text{提供 } 22\text{W})$$

验算: 提供的功率为 $6 + 22 = 28\text{W}$, 吸收的功率为 $20 + 8 = 28\text{W}$, 电路的功率平衡, 计算正确。

五、电能

电路的作用之一就是能量的转换, 电路在工作状态下总伴随着电能和其它形式能量的交

换, 电能是一个十分重要的物理量。

由式 (1-6) 可得: 从 t_1 到 t_2 时间内, 电路吸收 (消耗) 的电能为

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p dt \quad (1-12)$$

直流时

$$W = P(t_2 - t_1) \quad (1-13)$$

电能的 SI 单位为焦 [耳], 符号为 J, 它等于 1W 的用电设备在 1s 内消耗的电能。在工程上还采用 kWh (千瓦小时, 也叫度) 作为电能的单位。它们之间的换算关系为

$$1\text{kWh} = 1000\text{W} \times 3600\text{s} = 3.6 \times 10^6\text{J} = 3.6\text{MJ}$$

一般说来, 每一电气设备或器件在工作时都有一定的量值限额, 这种限额称为额定值, 它是我们使用电气设备或器件的依据。额定值包括额定电压、额定电流和额定功率。这些电气设备或器件在额定电压下才能正常、合理、可靠地工作, 例如 220V, 40W 的灯泡, 220V, 40W 分别是灯泡的额定电压和额定功率。使用时, 电压过高会损坏设备或器件, 过低则功率不足, 不能正常工作 (如电灯变暗等)。额定值用带有下标 N 的字母表示, 如额定电压、额定电流分别用 U_N 、 I_N 表示。

通常, 电气设备的额定值都会在铭牌上标注出来。使用电气设备时, 实际值等于额定值时的工作状态称为额定状态或满载; 实际值大于额定值时的工作状态称为过载或超载; 实际值小于额定值时的工作状态称为轻载或欠载。

第三节 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是分析集总参数电路的基本定律, 它从电路结构上反映了电路中所有支路电压和电流所遵循的基本规律。基尔霍夫定律包括基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。为了说明基尔霍夫定律, 先介绍电路的一些名词概念。

一、名词术语

以图 1-13 为例, 图中方框表示二端元件, 各元件电流参考方向如图所示。

电路中由元件组成的一段没有分支的电路称为支路。图 1-13 中元件 1、2、3 为一条支路, 元件 4、5 为一条支路, 元件 6、7 为一条支路, 元件 8 和元件 9 分别构成一条支路, 共有 5 条支路。

三条及三条以上支路连接在一起的连接点叫做节点, 图 1-13 中共有 c、e、g 三个节点。

由支路构成的闭合路径叫做回路。图 1-13 中, 元件 1、4、5、3、2 组成一个回路, 元件 1、2、3、9、7、6 也组成一个回路等。

平面电路中没有被支路穿过的回路叫做网孔。图 1-13 中, 元件 1、4、5、3、2 组成的回路称为网孔, 元件 6、7、9、5、4 组成的回路不称为网孔。

流过支路的电流称为支路电流, 图 1-13 中, i_1 、 i_2 、 i_3 、 i_4 、 i_5 就是各支路的支路电流。

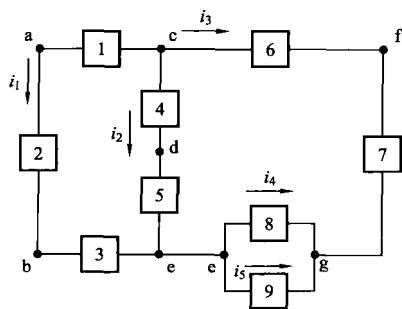


图 1-13 电路名词说明

支路两端之间的电压称为支路电压。图 1-13 中, u_{ce} 、 u_{cg} 、 u_{eg} 就是支路电压。

二、基尔霍夫电流定律 (KCL)

基尔霍夫电流定律给出了电路中各个支路电流之间的约束关系, 也叫基尔霍夫第一定律 (简称 KCL)。

电路中的任何一个节点均不能堆积电荷, 流入某处某一电荷量的电荷, 必须同时从该处流出同一电荷量的电荷, 这一结论称为电流的连续性原理。KCL 是电流的连续性原理在电路中的体现。

基尔霍夫电流定律的内容可表述为: 在任一瞬时, 流入电路中任一节点的支路电流之和等于流出该节点的支路电流之和。如图 1-13 所示, 电路中的一个节点 e, 流入节点的电流为 i_1 和 i_2 , 流出节点的电流为 i_4 和 i_5 , 则

$$i_1 + i_2 = i_4 + i_5$$

上式可整理成

$$i_1 + i_2 - i_4 - i_5 = 0$$

于是基尔霍夫电流定律可以换一种更常用的描述: 任何一个瞬时, 流入任何电路任一节点的各个支路电流的代数和为零。其数学表达式为

$$\sum i = 0 \quad (1-14)$$

对于直流电路, KCL 可写成

$$\sum I = 0 \quad (1-15)$$

在以上两式中, 按电流的参考方向列写方程, 规定流入节点的电流取正号, 则流出节点的电流取负号。当然, 也可作相反规定, 其结果是一样的。

在应用 KCL 列写电流方程时, 首先找节点, 其次应选定与该节点相连的各支路电流的参考方向, 最后规定流入 (或流出) 节点的电流为正, 代入上式即可。

KCL 不仅适于电路的任一节点, 根据电流连续性原理, 还可以推广到电路的任一假设的封闭面。在任一瞬时, 流入和流出该封闭面的电流代数和为零。如图 1-14 所示, 电路 N_1 中有 3 条支路与电路的其余部分连接, 其流出的电流为 i_1 、 i_2 和 i_3 , 则 $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ 。

根据 KCL, 流过同一支路的是同一个电流。

【例 1-4】 如图 1-15 所示, 已知 $I_1=10\text{A}$, $I_2=5\text{A}$, $I_3=3\text{A}$, $I_4=-2\text{A}$, 求 I 。

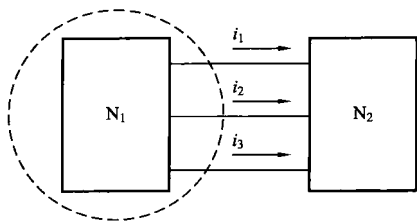


图 1-14 KCL 应用于假设的封闭面

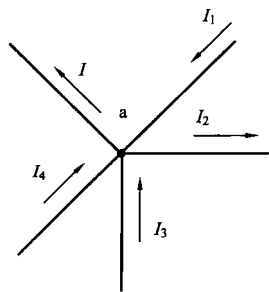


图 1-15 [例 1-4] 图

解题思路: 求电流用 KCL。在应用 KCL 时, 首先找节点, 其次规定流入 (或流出) 节点的电流为正, 最后根据标定的参考方向写 KCL 电流方程。

解 如果规定流入节点的电流为正, 则流出为负, 根据 KCL 得

$$I_1 - I_2 + I_3 + I_4 - I = 0$$

则

$$I = I_1 - I_2 + I_3 + I_4 = 10 - 5 + 3 + (-2) = 6 \text{ (A)}$$

如果规定流出节点的电流为正, 流入为负, 根据 KCL 得

$$-I_1 + I_2 - I_3 - I_4 + I = 0$$

则

$$I = I_1 - I_2 + I_3 + I_4 = 10 - 5 + 3 + (-2) = 6 \text{ (A)}$$

这说明, 在列写 KCL 方程时, 规定流入的电流为正, 或者规定流出的电流为正, 并不影响计算结果。但是在同一个 KCL 方程中, 规定必须一致。

KCL 适用于一切集总参数电路, KCL 与各元件的性质和工作状态无关。

三、基尔霍夫电压定律 (KVL)

基尔霍夫电压定律描述了电路中任一闭合回路内各段电压必须服从的约束关系, 它与支路元件的性质无关。不管什么性质的元件, 当它们连接成回路时, 各元件电压之间必须遵循基尔霍夫电压定律。基尔霍夫电压定律也叫基尔霍夫第二定律 (简称 KVL)。

它的内容可表述为: 任一时刻, 沿任一电路的任一回路绕行一周, 各段电压的代数和为零。其数学表达式为

$$\sum u = 0 \quad (1-16)$$

对于直流电路, KVL 可写成

$$\sum U = 0 \quad (1-17)$$

注意: 在列写 KVL 电压方程时, 首先找回路, 其次应选定该回路中各元件电压的参考方向及回路绕行方向 (一般为顺时针方向), 最后电压参考方向与回路绕行方向一致时, 该电压项前取正号, 否则取负号, 代入上式即可。

如图 1-16 所示, 沿回路 1、2、4、1 顺时针绕行一周, 则

$$U_2 + U_5 - U_6 = 0$$

由上式可得

$$U_6 = U_2 + U_5$$

上式表明, 节点 1、4 之间的电压是单值的, 不论沿元件 6 还是沿元件 2 和元件 5 构成的路径, 此两节点之间的电压是相等的。KVL 实质上是电压与路径无关这一性质的反映。

KVL 方程还可以推广到电路中的假想回路, 如图 1-17 所示的假想回路 abca, 其中 ab 段未画出支路, 设其电压为 u , 则顺时针绕行一周, 按图中规定的参考方向可列出

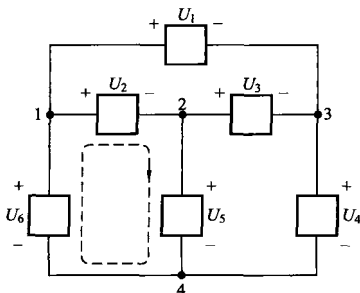


图 1-16 说明 KVL 的电路图

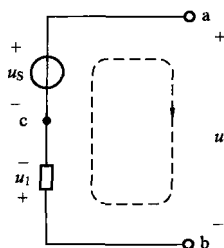


图 1-17 KVL 应用于假设的回路